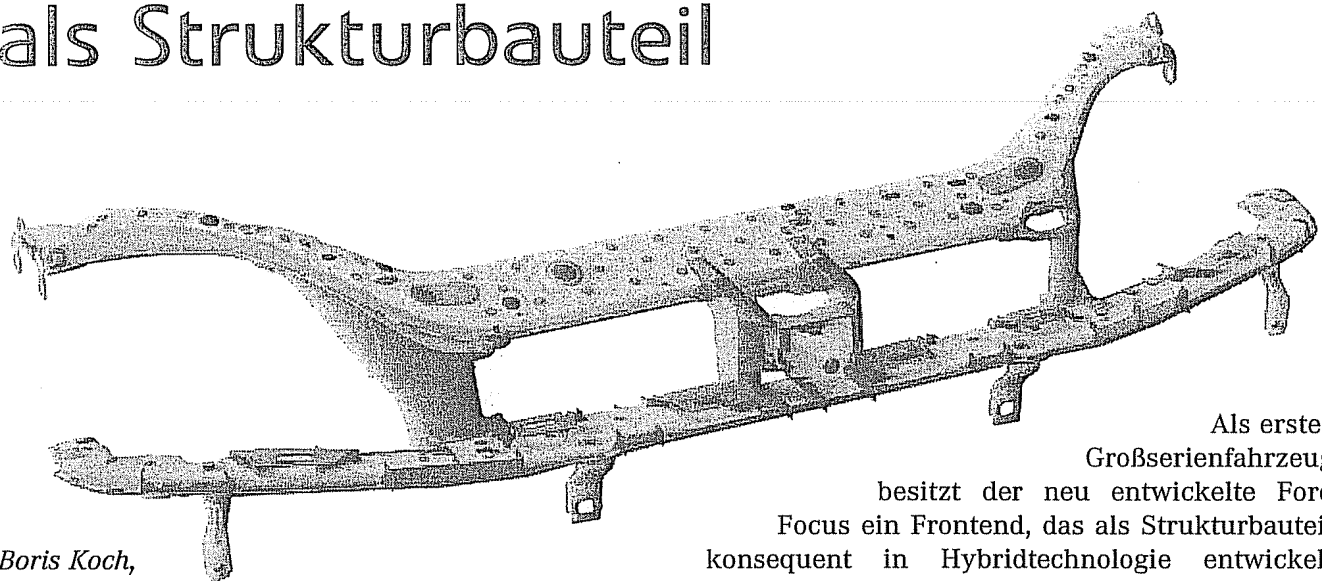


Hybrid-Frontend als Strukturbauteil



*Boris Koch,
Leverkusen,
Gerd Knözinger, Köln,
Thomas Pleschke,
Weißenburg, und
Hans Jürgen Wolf, Attendorn*

Als erstes Großserienfahrzeug besitzt der neu entwickelte Ford Focus ein Frontend, das als Strukturbauteil konsequent in Hybridtechnologie entwickelt wurde. Der Einsatz der Hybridtechnologie verringert das Bauteilgewicht, steigert die Qualität und reduziert die Herstellkosten. Zuverlässige Berechnungsmethoden mit Hilfe Finiter Elemente unterstützen die Auslegung dieser komplexen Bauteile bereits während der Konstruktion.

Das Frontend des Ford Focus (Bild 1) ist Bestandteil der Karosseriestruktur und trägt in allen Betriebs- sowie Crash-Situationen zur Stabilisierung des Fahrzeugvorderwagens bei. Ebenso werden die Positionen der Einbauteile, z.B. der

der Endmontage des Fahrzeugs zu vermeiden, muß das Frontend sehr engen Toleranzen entsprechen. Die Vielschichtigkeit dieser Anforderungen in Verbindung mit dem enorm gestiegenen Qualitätsstandard im heutigen Automobilbau sowie der permanenten Zielsetzung einer Gewichtsreduzierung läßt herkömmliche Bauweisen inzwischen an die Grenzen der Entwicklungsmöglichkeiten stoßen.

Die neuartige, von Bayer entwickelte

methoden miteinander und stellt der konstruktiven Entwicklung völlig neue Möglichkeiten zur Verfügung. In intensiver Zusammenarbeit des Rohstoffherstellers Bayer, des Automobilkonzerns Ford, der Dynamit Nobel Kunststoff GmbH und des Blechteileherstellers M.Kutsch GmbH sowie des Formenbauers Misslbeck entstand ein Karosseriebauteil (Titelbild) in höchster funktionaler Integrationsdichte.

Wirtschaftlich und vielseitig anwendbar

Hybridkonstruktionen ermöglichen die Herstellung komplexer und montagefertiger Bauteile in wenigen Arbeitsschritten und kombinieren dabei das wirtschaftliche Verarbeitungsverfahren Metall-Tiefziehen mit dem Spritzgießen: An ein tiefgezogenes und gelochtes Blech wird im Spritzgießverfahren eine Kunststoffstruktur angespritzt. Die Kunststoffschmelze dringt dabei durch die eingestanzten Öffnungen des Blechs und um dessen Umfangskanten und bildet zwischen der

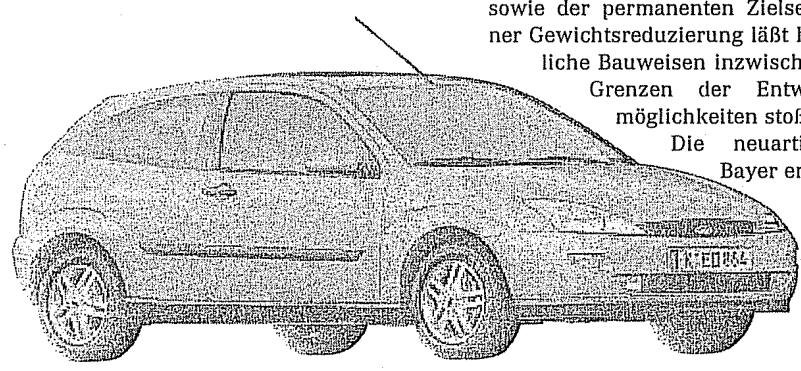


Bild 1. Als Bestandteil der Karosseriestruktur trägt das Frontend des Ford Focus in allen Betriebs- sowie Crash-Situationen zur Stabilisierung des Fahrzeugvorderwagens bei

Scheinwerfer, die Lage der Motorhaube und ihr Abstand zu den Kotflügelbänken über das Frontend definiert. Das heißt um zeitaufwendige Einstellarbeiten in

und patentierte Hybridtechnologie dagegen verbindet die Vorteile zweier vollkommen unterschiedlicher Werkstoffe sowie entsprechender Produktions-

www.kunststoffe.de
KU Kunststoffe Online-Archiv
Carl Hanser Verlag, München

Formnestwand des Werkzeugs und dem eingelegten Metallteil einen Knopf bzw. eine Klammer und einen Keder (Bild 2). Die entstehende form- bzw. kraftschlüssige Verbindung ist hochbelastbar, auch ohne Verwendung eines Haftvermittlers. Der übliche Korrosionsschutz einer kathodischen Tauchlackierung (KTL) ist auch nach dem Spritzprozeß uneingeschränkt funktionsfähig und stört nicht die Verbindungsintensität der ungleichen Materialien. Die entstehende Materialverbundstruktur verfügt über physikalische Eigenschaften, die mit homogenen Materialien nicht zu erzielen sind. Die tragenden Metallstrukturen des Materialverbunds lassen sich sehr dünnwandig auslegen, denn die filigran angespritzte Verrippung aus Kunststoff wirkt der Neigung derartiger dünner Metallkonstruktionen, unter Belastung zu knicken oder zu beulen, zuverlässig entgegen. Dadurch können die Metallstrukturen trotz geringster Wanddicken näher zur Fließgrenze des Materials hin belastet werden, ohne vorher infolge geometrischer Instabilität zu versagen.

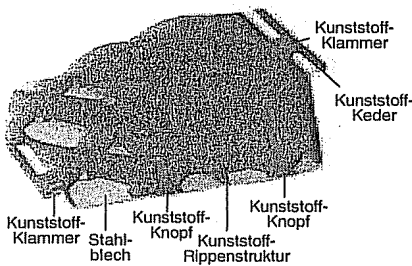


Bild 2. Profilquerschnitt einer Hybridstruktur mit Kennzeichnung der speziellen Konstruktionselemente

Die Bilder 3 und 4 zeigen eine Gegenüberstellung von Kraft-Verformungs-Charakteristiken verschiedener Prüfkörper, die auf Druck und Biegung entsprechend dem im Bild unten rechts dargestellten Schemata belastet wurden. Die grüne Kurve (1) entspricht der Charakteristik eines einfachen schalenförmigen Blechprofils, wie es im Karosseriebau üblicher Weise verwendet wird. Das Leistungsvermögen des Blechbauteils läßt sich konstruktiv durch Verwendung eines Schließblechs steigern (blaue Kurve 2). Die Erhöhung der Belastbarkeit des Blechprofils durch den Verbund mit der Kunststoffrippenstruktur ist deutlich erkennbar (rote Kurve 3). Alle Prüfkörper weisen hier eine Blechwandstärke von 0,7 mm auf. In weiteren Tests konnte be-

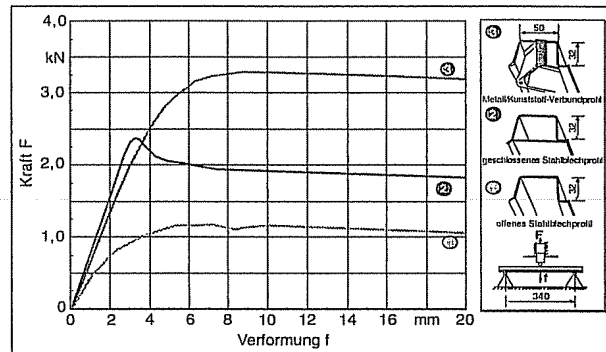


Bild 3. Kraft-Verformungscharakteristik bei Biegebelastung verschiedener Profilabschnittsmuster

stätigt werden, je geringer die Blechwanddicke und je größer die Profilquerschnitte, desto stärker wirkt sich der Stabilisierungseffekt aus. Neben der deutlich höheren Belastbarkeit der Hybridvarianten ist gleichzeitig auch eine wesentlich verbesserte Energieaufnahme erreichbar. Desweiteren läßt sich die angespritzte Rippenstruktur auch zur Erhöhung der extrem niedrigen Verdrehsteifigkeit der offenen Blechprofile nutzen (Bild 5).

Zusätzliche Schließbleche sind oft nicht mehr erforderlich, was die rationelle Herstellung von Blechstrukturen entscheidend verbessert. Auch wenn sich die Steifigkeit eines geschlossenen Blechprofils durch die Kunststoffverrippung nicht ganz erreichen läßt, sind die Ergebnisse konstruktiv verwertbar, und im Gegensatz zur reinen Stahllösung kann die Verdrehsteifigkeit über den E-Modul des Kunststoffs sehr einfach variiert werden. Grundsatzuntersuchungen bestätigen die Effizienz der Kunststoff/Metall-Verbundstrukturen in bezug auf das Gewicht der einzelnen Testprofile (Bild 6).

Präzision im Leichtbau

Neu bei der Produktion des Ford Focus ist, daß erstmals ein Frontend als

Hybridausführung bereits während der Karosserieherstellung ans Fahrzeug montiert wird. Diese Vorgehensweise läßt sich nur mit einem sehr präzise gefertigten Bauteil durchführen, das entsprechend der angrenzenden Karosseriestrukturen ausgerichtet und fixiert wird und damit gleichmäßig schmale Fugenbilder und flächenbündige Übergänge (new edge design) zwischen den einzelnen Karosserieteilen des Vorderwagens ohne zusätzliche Richt- bzw. Einstellarbeiten ermöglicht.

Die Verbundkonstruktion besteht aus zwei profilierten Stahlblechteilen und einem Schließblech, die mit einer spritzgegossenen Kunststoffrippenstruktur ergänzt und verbunden sind, wobei das Blech nicht vollflächig bedeckt ist. Die Bleche sind dünner ausgelegt als es bei einer reinen Stahlblechkonstruktion möglich ist. Durch die Verwendung von hochfestem Stahlblech sowie der Stabilisierung durch die Kunststoffrippen ist diese Konstruktion sogar höher belastbar. Gegenüber einer reinen Stahlvariante entfallen viele mit großen Toleranzen und Zusatzkosten verbundene Füge- und Montageoperationen. Im Vergleich mit einer reinen Kunststofflösung ist die Konstruktion in weit geringerem Maße von Einflüssen wie Material-

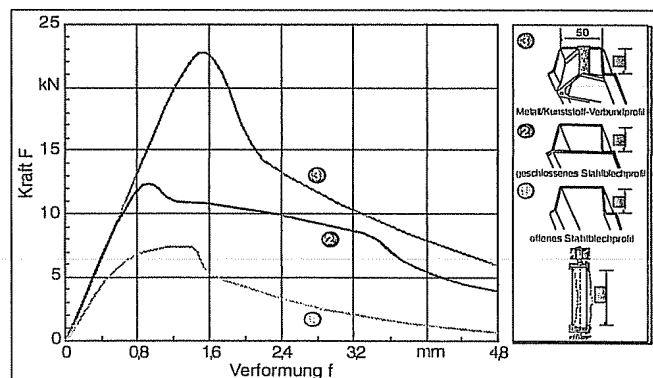


Bild 4. Kraft-Verformungscharakteristik bei Druckbelastung verschiedener Profilabschnittsmuster

schwindung, Klima und Temperaturschwankungen abhängig. Zusätzlich kommt ihr der hohe E-Modul des Stahlblechs zugute.

Das Spritzgießen ermöglicht die Integration einer Vielzahl von Funktionen in einem Fertigungsschritt, z.B. Befestigung und Positionierung der Anbauaggregate wie Kühler, Haubenschloß, Kotflügel, Kondensor, Scheinwerfer, Kühlergrill, Ladeluftkühler und Scheinwerferwaschdüsen. Befestigungselemente zur Fixierung der Stoßfängerschalen, für Schläuche, Haubenschloßvorfixierung sowie ein Gehäuse zur Abschirmung

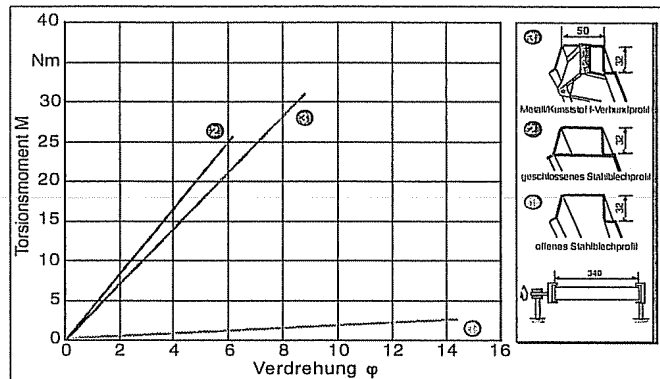


Bild 5. Kraft-Verformungscharakteristik bei Torsionsbelastung verschiedener Profilabschnittsmuster

Bild 6. Gewichtsbezogene Stabilisierungsfaktoren bei Biegung, Druck und Torsion an verschiedenen Profilabschnittsmustern

| Beanspruchung Profilart | Beanspruchung | | |
|--|--------------------------|------------------------|---------------------------------------|
| | Biegung Belastbarkeit | Druck Belastbarkeit | Torsion Steifigkeit |
| PA-GF 30% x-verrippt Stahl s = 0,7 mm | 1,8 | 1,8 | 13 |
| Stahl s = 0,7 mm | 1,1 | 1 | 28 ¹⁾ 6,5 ²⁾ |
| Stahl s = 0,7 mm | 1 | 1 | 1 |

1) mit geschlossenen Stirnflächen; 2) mit offenen Stirnflächen

des Schloßbereichs werden u.a. gleich mit angespritzt (Bild 7).

Zusätzlich ließ sich mit Hilfe des ökonomischen Herstellungsprozesses eine weitere innovative Funktion im Frontend realisieren: Um die Diebstahlsicherheit des Fahrzeugs zu erhöhen, wurde ein abgesichertes Schließsystem für die Motorhaube mit Schließzylinder in das Frontend integriert.

Die Montage sämtlicher Anbauteile ist schnell und einfach durchzuführen, die Aufnahmen geben eine genaue Ausrichtung der Anbauaggregate bereits vor, was sich positiv auf die Montagekosten und auf die Qualität des Fahrzeugs auswirkt.

Berechnungsmodelle optimieren Hybridkonstruktionen

Eine Herausforderung der Hybridkonstruktionen ist das Schwindungsverhalten der Polymerwerkstoffe. Insbesondere zwischen den Verbindungsstellen von Metall und Kunststoff entstehen Spannungen, aus denen Verformungen resultieren können. Die Verzugsberechnung

ist daher von großer Bedeutung, und das besonders für glasfaserverstärkte Produkte, weil sich durch die Orientierung der Fasern die Schwindung beeinflussen läßt.

Ein von der Bayer AG weiterentwickeltes, komplexes Berechnungsmodell bietet die Möglichkeit, den durch Materialschwindung möglichen Verzug von Hybridstrukturen zu berechnen und auszugleichen. Die Methode basiert auf einer Verknüpfung von rheologischen und mechanischen Finite-Elemente (FE) Berechnungsmodellen.

In einem ersten Schritt wird ein getrenntes FE-Modell der Metallstruktur sowie der Kunststoffstruktur erstellt. Zur Bestimmung der für die Schwindung maßgebli-

chen Faserorientierung im Bauteil wird eine Füllsimulation durchgeführt. Die Kenntnis der genauen Faserorientierung ist für eine Verzugsberechnung besonders wichtig, da die Schwindung des Kunststoffs je nach Faserlage unterschiedlich groß ist. Quer zur Fließrichtung der Kunststoffschmelze ist die Schwindung größer als längs zur Fließrichtung.

Über eine Software-Schnittstelle werden die Ergebnisse der rheologischen Berechnung sowie die beiden Finite-Elemente Modelle des Kunststoffs und des Metalls zusammengeführt. In einer anschließenden mechanischen Berechnung lassen sich die durch Schwindung des Kunststoffs hervorgerufenen inneren Kräfte ermitteln und der Verzug der gesamten Hybridstruktur berechnen (Bild 8).

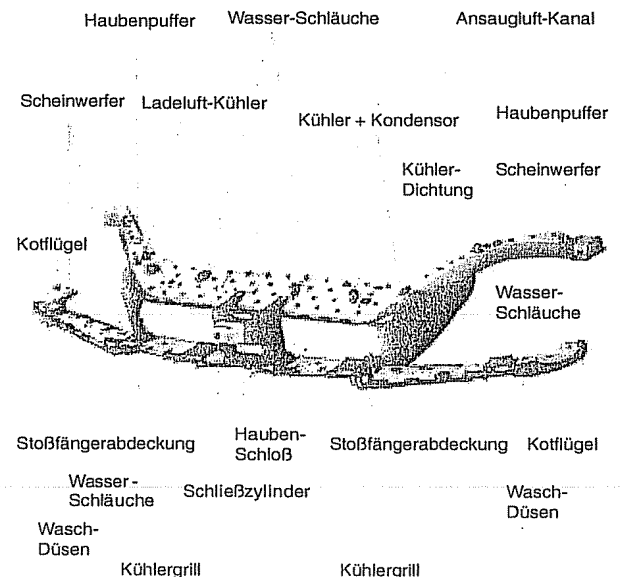


Bild 7. Funktionsintegration am Frontendträger des Ford Focus

Die komplexe Auslegungsmethode ermöglicht Vorausberechnungen, anhand derer die Maßhaltigkeit von Hybridbauteilen im Vorfeld optimiert werden kann, ohne daß zuvor langwierige Probeläufe erforderlich wären. Der Herstellungsprozeß wird sicherer und kostengünstiger.

Die Zuverlässigkeit des Berechnungsmodells wurde im Fall des neuen Frontends anhand von Probeteilen überprüft, und das Modell stellte sich als sehr praxishaus heraus.

Polyamid erfüllt extreme Anforderungen

An den Polymerwerkstoff werden sehr hohe Anforderungen gestellt. Zum Einsatz kommt bei dieser Anwendung das glasfaserverstärkte Polyamid 6 (Typ: Durethan BKV 30, Hersteller: Bayer). Beson-

In der Anwendung des Hybrid-Frontends zeigt das Polyamid eine gute Dauerfestigkeit bei wechselnden Beanspruchungen.

Der teilkristalline Polymerwerkstoff eignet sich besonders für die Kombination mit Metall. Die Fähigkeit, Eigenspannungen während des Spritzprozesses aber auch im praktischen Gebrauch durch Relaxation abzubauen, ist hier von entscheidender Bedeutung.

Die Glasfaserverstärkung garantiert eine hohe Dimensionsstabilität bei einer ebenso außerordentlich hohen Wärmeformbeständigkeit. Die erforderlichen Festigkeiten sind auch bei Temperaturen von über 100 °C gewährleistet. Das Hybridteil wird bei Ford, wie bereits dargestellt, während des Rohbaus mit der Karosserie verschraubt. Deshalb muß der Kunststoff mindestens 20 min lang eine

Temperaturbeständigkeit von über 190 °C aufweisen. Denn die Karosserie-Rohbauten durchlaufen die gesamte kathodische Tauchlackierung (KTL) und anschließend die Trocknungsöfen, wo sie Temperaturen bis 200 °C ausgesetzt sind.

Automatisierte Herstellung

Hergestellt werden die einbaufertigen Frontend-Bauteile bei Dynamit Nobel, Papenheim und Valencia. Die Produktionsanlagen bestehen jeweils aus größeren Spritzgießmaschinen mit einer auf das Bauteil ausgerichteten Peripherie. Der Produktionsprozeß beginnt mit der manuellen Positionierung der vorgefertigten Blechteile auf einem Kettenfördersystem, das sich mit mehreren Einlegesätzen bestücken läßt und gleichzeitig die fertigen Bauteile dem Bedienpersonal zurückführt.

Das Handlingsystem des Linearroboters übernimmt die Blechteile und überprüft sie mit Hilfe von Sensoren auf Vollständigkeit und die definierte Maßhaltigkeit. Im Anschluß fährt der Linearroboter in das geöffnete Spritzgießwerkzeug. Hier entnimmt der Roboter das fertige Bauteil und legt im

gleichen Arbeitsschritt unmittelbar nachfolgend die Blechteile in das Werkzeug ein (Bild 9), wo sie mit Hilfe der Kernzüge fixiert werden. Auf dem Weg zum Kettenfördersystem passiert das Frontend eine Angußabschneidevorrichtung, wo alle Angüsse gleichzeitig abgeschnitten werden. Vor Ort gemahlen gelangen sie unmittelbar zurück in den Rohstofffluß.

Die Frontends werden manuell dem Kettenfördersystem entnommen und im benachbarten Einschraubtisch positioniert. Hier schraubt ein Roboter nacheinander zuvor angesteckte Befestigungslaschen an. Die Schrauben werden automatisch zugeführt und verfügen bereits über eine aufgerollte Unterlegscheibe. Nach dem Festziehen löst der Roboter die Schrauben wieder, so daß die Befestigungslaschen beweglich bleiben, und sich das Frontend-Bauteil bei der Endmontage der übrigen Karosserie anpassen kann.

Trotz der Komplexität des Bauteils und der hohen Anforderung an die Maßhaltigkeit zeichnet sich die Produktion durch sehr geringe Ausschußraten aus.

Einfaches Recyclingverfahren

Trotz der verschiedenen eingesetzten Werkstoffe läßt sich die Hybridkonstruktion völlig unproblematisch rezyklieren: In einer Hammermühle wird das Verbundteil zerkleinert. Über Siebe und Magnetabscheider lassen sich die beiden Komponenten gut separieren. Die Sortenreinheit der so gewonnenen Mate-

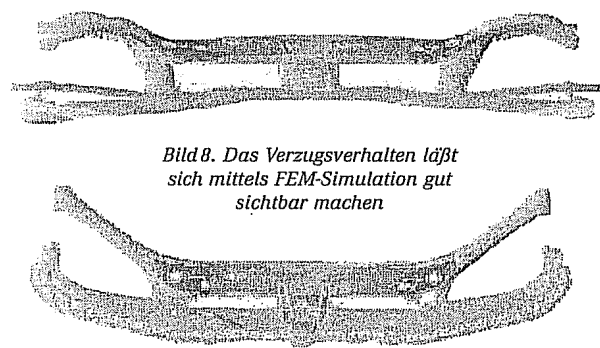


Bild 8. Das Verzugverhalten läßt sich mittels FEM-Simulation gut sichtbar machen

ders für technische Strukturbauteile haben sich glasfaserverstärkte Polyamidwerkstoffe in langjährigem Einsatz in einer Vielzahl von Anwendungen bewährt. Durethan-Typen bieten je nach Glasfasergehalt Festigkeiten bis zu 150 MPa und Steifigkeiten mit einem Zugmodul bis hin zu 10 000 MPa (konditioniert).

Bedingt durch die Fähigkeit der Wasseraufnahme besitzt Polyamid im Vergleich zu anderen glasfaserverstärkten Polymerwerkstoffen ein deutlich höheres Zähigkeitsniveau. Weiter steigern läßt sich die Zähigkeit, insbesondere die Schlagzähigkeit, besonders im Tieftemperaturbereich durch eine zusätzliche Elastomermodifikation. Die gute Zähigkeit des Polyamids ist verantwortlich für ein gutes Überlastverhalten der Hybridstrukturen.

Allen teilkristallinen Durethan-Typen gemeinsam ist die außerordentlich gute dynamische Festigkeit (Dauerfestigkeit).

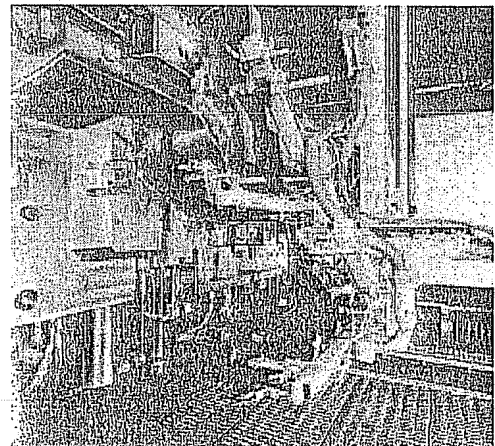


Bild 9. Die Herstellung des Hybridteils erfolgt automatisch vom Einlegen der Blechteile bis zum Abschneiden der Angüsse vom fertigen Bauteil

rialien liegt bei über 98%. Die wiedergewonnenen Werkstoffe können aufbereitet und direkt in den Produktionskreislauf zurückfließen oder für die Fertigung anderer Teile eingesetzt werden. Prüfkörper aus dem rezyklierten Kunststoff zeigen nahezu das gleiche Eigenschaftsprofil wie das Originalmaterial.

Resümee

Die Hybridtechnologie eröffnet der Automobilindustrie ein großes Innovationspotential insbesondere für die Herstellung von Montageträgerbauteilen für umfangreiche Systembaugruppen mit hoher Integration. Als Hauptmerkmale bietet sie: exzellente Struktureigenschaften und gutes Überlastverhalten bei geringem Gewicht, hohe Integrationmöglichkeit von Funktionselementen bei gleichzeitig hoher Präzision in der Herstellung als auch im praktischen Gebrauch. Hybridteile lassen sich in Großserien nach den wirtschaftlichsten Verfahren herstellen.

Neben dem Frontend sind weitere Strukturbauteile, wie beispielsweise der Schalttafelquerträger unterhalb der Instrumententafel, Strukturbauteile in aufwendig ausgestatteten Fahrzeugsitzen, Strukturen der Mittelkonsole oder der hinteren Hutablage im Fahrzeug und vieles mehr in der Hybridtechnologie umsetzbar.

Die Hybridbauweise ist in der Großserie des Automobilbaus erprobt – damit ist der Weg für weitere Anwendungen geebnet.

Die Autoren dieses Beitrags

Dipl.-Ing. Boris Koch, geb. 1962, ist bei der Kunststoff-Anwendungstechnik der Bayer AG, Leverkusen, für die Projektleitung von Hybridbauteilen zuständig.

Dipl.-Ing. Gerd Knözinger, geb. 1941, ist gelernter Flugzeugbaumechaniker und arbeitet nach Tätigkeiten u. a. in der Motoren- und Räderentwicklung für Ford seit 1990 im Bereich Body Engineering.

Dipl.-Ing. (FH) Thomas Pleschke, geb. 1966, ist bei der Dynamit Nobel Kunststoff GmbH, Weibenburg, in der Projektleitung der Sales & Engineering Business Area Automotive Ford tätig.

Dr.-Ing. Hans Jürgen Wolf, geb. 1960, ist in der Geschäftsleitung der M. Kutsch GmbH, Attendorn, verantwortlich für Vertrieb und Engineering.

Aus der Sicht des Automobilherstellers

Gerd Knözinger ist Projektleiter für das Hybrid-Frontend des Focus bei der Ford-Werke AG, Köln, und betreute die Entwicklung des Frontends von der Idee bis zur Produktion. Zur Wirtschaftlichkeit und den technischen Anforderungen an dieses Bauteil nimmt er wie folgt Stellung:

- ? Die Automobilindustrie gilt zwar generell als Innovationstreiber in der Kunststofftechnologie, der Einsatz eines Hybridbauteils aus Kunststoff und Stahlblech in der Automobilkarosserie ist allerdings außergewöhnlich und sensationell – vielleicht auch mutig. Wodurch wurde dieser große Schritt veranlaßt?
- ! Die modernen Pkw-Karosserien zeichnen sich durch eine immer höhere Präzision aus: Die Spaltmaße zu beweglichen Teilen, z.B. der Motorhaube, betragen heute weniger als 4mm. Diese hohe Präzision ist bei „maßgebenden“ Bauteilen, die aus einem Blechzusammenbau oder nur aus Kunststoff bestehen, nicht mehr zu erreichen. Daher müssen die sichtbaren Bauteile in der Endmontage justiert werden, um ein halbwegs akzeptables Aussehen des Fahrzeugs zu gewährleisten.



- ? Sie waren also auf der Suche nach einer Technologie, die die kostenintensive Justierarbeit überflüssig macht?
- ! Exakt – ein „maßgebendes“ Bauteil, wie das Frontend, sollte so beschaffen sein, daß alle nachfolgend montierten Bauteile ohne weitere Justierung mit hohem Zeitgewinn angebaut und genau positioniert werden können.

- ? Dieses Potential entdeckten Sie in der Hybridtechnologie?
- ! Aufgrund der Kombination von Metall und Kunststoff in einem Hybridbauteil lassen sich zahlreiche Attribute erzielen:
An vorderster Stelle stehen höhere spezifische, mechanische Belastbarkeiten sowie eine höhere spezifische Arbeitsaufnahme. Gleichzeitig bietet die Hybridtechnologie eine erheblich höhere Maßgenauigkeit in der Produktion als auch im praktischen Gebrauch des Fahrzeugs. Dies gilt für den gesamten Temperaturbereich, in dem ein Fahrzeug betrieben wird und ist vergleichbar mit Stahl, denn die Wärmeausdehnung des Hybridteils wird durch die Stahlblechkomponente bestimmt. Mit der Kunststofftechnologie lassen sich allerdings zahlreiche Funktionen integrieren, und das Bauteilgewicht ist geringer als bei einer reinen Kunststoff- oder Stahlkonstruktion. Darüber hinaus fallen die Kosten günstiger aus als bei einer reinen Kunststoff- oder Stahlbauweise.

- ? Wie lassen sich die Hybridbauteile mit der übrigen Karosserie verbinden?
- ! Hybridbauteile können mittels aller bekannten Fügmethoden mit der Karosserie verbunden werden. Gleichzeitig erfüllen sie die aktuellen Forderungen der Automobilbauer, sie verringern das Gewicht, erhöhen die Leistung und reduzieren die Kosten. Da es sich vorzugsweise um große Bauteile handelt, ist das Einsparpotential erheblich. Beim Ford Focus wurde es durch den Einsatz des Frontends in Hybridbauweise sogar erst möglich, das Fahrzeug in einem akzeptablen Kostenrahmen und der geforderten Qualität herzustellen.

- ? Nach unseren Informationen wurde Ihre Innovationsbereitschaft mehrfach belohnt.
- ! Sie wurde nicht belohnt sondern ausgezeichnet. Für dieses Frontend erhielten wir folgende Auszeichnungen: European Technical Achievement Award 1998 der Ford Motor Company und Automotive Division Award '98 der Internationalen Gesellschaft für Kunststofftechnik e.V.